

Алгоритм обнаружения поврежденной обмотки и оценки степени повреждения с помощью импедансных и фазочастотных характеристик АД с КЗР – снижение амплитуды импедансной и увеличение частоты первого «резонанса» фазочастотной характеристик.

На основании приведенных результатов измерений наиболее распространенных повреждений или направленности развития неисправностей изоляции обмоток и состояния сердечника наибольшие изменения в импедансных и фазочастотных характеристиках связаны со следующими параметрами: амплитудой первого «резонанса» импедансных характеристик и сдвигом его частоты; формой фазочастотных характеристик.

Сравнительный анализ частотных характеристик однофазных и трехфазных трансформаторов, а также для АД при диагностировании предотказных состояний и отказов авторы используют в качестве основы при создании универсальной диагностической системы определения и классификации неисправностей на основе сверточных нейронных сетей. В результатах работы могут быть заинтересованы энергетические предприятия Республики Беларусь.

#### Список литературы

1 **И. Л. Громыко.** Метод неразрушающего контроля состояния однофазных и трёхфазных трансформаторов на основе частотных характеристик / И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 158–167. – DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-158-167.

УДК 621.332:625.42

### ВЫПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЕМНИКЕ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

*В. А. ЗАГОРЦЕВ, О. С. АНАНЬЕВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

С развитием железнодорожного транспорта и, в частности, в связи с электрификацией участков железных дорог возникла потребность в определении весовых норм грузовых поездов, формировании графиков движения, выполнении требований безопасности движения, а также другие значимые вопросы. В процессе поиска ответов возникла дисциплина «Теория локомотивной тяги», результатом деятельности которой стали «Правила тяговых расчетов».

При электрификации железных дорог, а также городского транспорта необходимо выполнение электрических расчетов, целью которых является выбор основных элементов системы тягового электроснабжения (СТЭ). Для определения нагрузки этих элементов необходимы тяговые расчеты для планируемых к эксплуатации типов электроподвижного состава как грузового, так и пассажирского, особенно в случае высокоскоростного пассажирского движения. Итоговый результат тяговых расчетов, необходимый для выполнения электрических – это зависимость тока поезда от его относительной координаты. На основании этих данных для заданных типов поездов, формируется необходимый график их движения по электрифицируемому участку и определяются нагрузки элементов СТЭ.

При выполнении тяговых расчетов ток поезда в общем случае определяется его скоростной характеристикой (зависимостью тока поезда, от скорости его движения), которая приводится для некоторого «номинального значения напряжения» на токоприемнике электрического локомотива, например, 25000 В (50 Гц) переменного или 3000 В постоянного тока для электрифицированных железных дорог, или 750 В постоянного тока – для моторвагонного подвижного состава метрополитена. При этом на практике уровень напряжения на токоприемнике изменяется в широких пределах, в зависимости от величины нагрузки СТЭ и режимов работы электроподвижного состава.

Поезд, двигаясь по перегону, преодолевает силы сопротивления движению, то есть расходует определенную электрическую мощность, которая на постоянном токе будет определяться текущим режимом движения (величиной потребления тока) и уровнем напряжения на токоприемнике. В зависимости от типа привода (коллекторный постоянного тока или асинхронный) влияние изменения напряжения на токоприемнике локомотива на его параметры будут отличаться: для коллекторного привода уменьшение уровня напряжения приводит к снижению скорости движения на текущей позиции контроллера машиниста, тогда как для асинхронного тягового привода, в котором используются

преобразователи с плавным регулированием амплитуды и частоты напряжения, подаваемого на двигатели, изменение напряжения приведет к изменению потребляемого тока пропорционально текущей электрической мощности, потребляемой при движении на выбранной позиции контроллера. То есть выходит, что в случае отличия напряжения на токоприемнике от номинального значения ток, потребляемый поездом, также необходимо корректировать.

Для некоторой оценки величины отличия нагрузки элементов СТЭ при использовании «номинальных» характеристик потребляемого тока, а также для варианта «корректировки» тока с учетом изменения напряжения на токоприемнике (пропорционально потребляемой электрической мощности) были выполнены тяговые и электрические расчеты на примере участка Минского метрополитена. В рамках разработки программного обеспечения по расчету режимов совместной работы электрического подвижного состава и систем тягового электроснабжения [1] была реализована возможность учета изменения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава с дальнейшим определением параметров работы СТЭ.

В разработанной модели был реализован следующий алгоритм учета изменения напряжения на токоприемнике:

- тяговые расчеты выполняются предварительно, и для каждого типа поезда определяется зависимость потребляемого тока от его относительной координаты при номинальном напряжении на токоприемнике 750 В;

- далее формируется мгновенная схема замещения участка электроснабжения, и для каждой итерации расчета (например, с шагом 0,25 с) определяются координаты положения поездов и потребляемые токи согласно графику движения;

- для варианта *без корректировки тока* поезда расчеты выполняются, пока не завершится установленное время моделирования (например, 2 часа), а для варианта *с корректировкой тока* поезда на первой итерации расчета токи поездов не корректируются и принимаются по результатам тяговых расчетов (при номинальном напряжении на токоприемнике).

После расчета мгновенной схемы замещения определяются токи и напряжения в ее элементах, а также на электрических нагрузках – токоприемниках поездов. Полученные значения напряжения на токоприемниках сохраняются для каждого поезда, и уже на следующей итерации расчета значения тока, потребляемого поездом по результатам тягового расчета, корректируются пропорционально отличию напряжения на токоприемнике от номинального значения в 750 В. В таблице 1 приведены результаты электрических расчетов для четырех совмещенных тяговых подстанций (СТП) и параллельного графика движения поездов с интервалом 82 с (44 пары поездов в час) за время моделирования, равное двум часам.

Таблица 1 – Результаты электрических расчетов

Параметр	Без корректировки тока			С корректировкой тока		
	–5	0	5	–5	0	5
Изменение напряжения на шинах 10 кВ всех СТП, % (от номинального)						
Расход электрической энергии по результатам тяговых расчетов (при номинальном напряжении на токоприемнике 750 В), кВт·ч	13574	13574	13574	13574	13574	13574
Расход электрической энергии по результатам электрических расчетов (с учетом реального напряжения на токоприемнике), кВт·ч	13510	14260	15009	13557	13564	13571
Суммарный расход электрической энергии на шинах 825 В всех СТП, кВт·ч	14438	15196	15807	14389	14302	14230
Минимальное напряжение на токоприемнике, В	665	706	747	644	698	749
Отличие расхода электроэнергии потребленной на тягу по результатам тяговых и электрических расчетов, %	–0,48	4,81	9,56	–0,13	–0,08	–0,02
Потери в тяговой сети, %	6,43	6,16	5,05	5,78	5,16	4,63

Изменение уровня напряжения на шинах 10 кВ (см. таблицу 1) влияет на уровень напряжения в тяговой сети для электроподвижного состава, поэтому, изменяя этот параметр, можно выполнить сравнение двух режимов электрических расчетов («без корректировки тока» и «с корректировкой тока»). Как видно из таблицы 1, уменьшение напряжения на шинах 10 кВ СТП приводит к уменьшению среднего напряжения на токоприемниках (возникают максимальные его просадки), из-за чего отличие в расходах электрической энергии на тягу по результатам тяговых и электрических расчетов минимально. Это позволяет сделать вывод, что уровень реально-

го напряжения на токоприемниках близок к номинальному. В свою очередь установка напряжения +5 % на шинах СТП приводит к достаточно большому отклонению в потреблении электроэнергии, и оно оказывается завышенным почти на 10 %. То есть нагрузка элементов СТЭ также оказывается завышенной, что может сказаться на итоговом выборе ее основных элементов.

Выполнение электрических расчетов «с корректировкой тока поезда» позволяет исключить завышение нагрузки элементов СТЭ при изменении уровня напряжения в тяговой сети как в случае его корректировки регулированием на стороне 10 кВ СТП, так и в случае отклонения параметров смежных тяговых подстанций (например, мощности коротких замыканий).

#### Список литературы

1 Загорцев, В. А. Разработка имитационной модели системы тягового электроснабжения / В. А. Загорцев, О. С. Ананьева, В. Н. Подольская // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. (Гомель, 24–25 ноября 2022 г.) : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 119–121.

УДК 621.311:625.42

### ПРИМЕНЕНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

*В. А. ЗАГОРЦЕВ, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Исследование эффективности применения накопителей электрической энергии (НЭЭ), как в системах тягового электроснабжения (СТЭ), так и на электрическом подвижном составе (ЭПС) является актуальной тематикой многих научно-исследовательских работ, выполняемых в настоящее время. Не стала исключением и данная работа, в рамках которой исследовалась эффективность применения накопителей на ЭПС постоянного тока метрополитена.

Как известно, при рекуперативном торможении электрическая энергия, вырабатываемая тяговыми электродвигателями, возвращается с токоприемника электрического локомотива в контактную сеть. При этом ее потребителями могут выступать другие локомотивы, работающие в режиме тяги в зоне питания тяговой подстанции и нетяговые потребители, получающие питание от тяговой сети. В случае избытка рекуперированной электроэнергии или при отсутствии потребителей происходит ее поступление в систему внешнего электроснабжения из тяговой сети [1]. На Минском метрополитене, на примере которого выполнялись тяговые и электрические расчеты, возврат энергии рекуперации в систему внешнего электроснабжения невозможен, так как на тяговых подстанциях установлены выпрямительные агрегаты, без возможности инвертирования мощности от тяговой сети. Поэтому для данного типа систем тягового электроснабжения (СТЭ) наиболее актуальными могут быть следующие способы сохранения и использования энергии рекуперации: установка накопителей на электрическом подвижном составе, на совмещенных тяговых подстанциях (СТП) или на межподстанционной зоне. В рамках разработки программного обеспечения по расчету режимов совместной работы ЭПС и систем тягового электроснабжения [2] была реализована возможность моделирования НЭЭ на электроподвижном составе, с дальнейшим определением параметров работы СТЭ.

В разработанной модели был реализован следующий алгоритм применения НЭЭ:

- за основу был принят НЭЭ с параметрами, схожими с реальным прототипом, использованным в работе [3];

- заряд и разряд НЭЭ происходил с некоторыми потерями (принято 15 % [3]), а также было установлено ограничение по максимальному разрядному току (4000 А), т. е. в случае если ток поезда превышал данное ограничение, недостающее количество потреблялось из тяговой сети;

- процесс заряда НЭЭ происходил в режиме рекуперативного торможения и показан на рисунке 1, а, где отрицательное значение тока  $I_{\text{НЭЭ}}$  соответствует заряду НЭЭ, при этом напряжение  $U_{\text{НЭЭ}}$  увеличивается;

- разряд НЭЭ происходил при движении поезда в режиме тяги (при разгоне поезда со станции после остановки), при этом положительное значение тока  $I_{\text{НЭЭ}}$  (см. рисунок 1, а) и уменьшение напряжения  $U_{\text{НЭЭ}}$  свидетельствуют о разряде накопителя;